

[ ARTÍCULOS ]

# Corrección activa del factor de potencia en cargas no lineales

## RESUMEN

Este artículo describe, en forma general, la implementación de un corrector activo para el mejoramiento del factor de potencia en cargas no lineales. El proyecto que involucra elementos y conceptos poco usados en el proyecto curricular de tecnología eléctrica, como los microcontroladores y la electrónica de potencia, busca generar una alternativa de solución diferente de los métodos pasivos convencionales, utilizados en cargas no lineales para la reducción de la distorsión armónica y el aumento del factor de potencia.

Este proyecto fue presentado como requisito para optar por el título de tecnólogo en electricidad de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

### Palabras clave

Factor de potencia, corrección activa, PFC, convertidores DC/DC, boost, distorsión armónica.

DIRECTOR: ING. FREDY MARTÍNEZ



**DIEGO FERNANDO GÓMEZ MOLANO**

Tecnólogo en Electricidad de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Áreas de interés: microcontroladores y aplicaciones de los convertidores DC/DC.  
E-mail: diegomes@usa.com

## Introducción

Hoy en día, gracias a la masificación del uso de equipos electrónicos en industrias, pero principalmente en oficinas y residencias, se presenta gran cantidad de distorsión en las ondas de corriente y voltaje de la red eléctrica, debido a los circuitos rectificadores de onda que contienen estos equipos [1] (puente rectificador y filtro capacitivo como fuente primaria de alimentación DC) (figura 1).

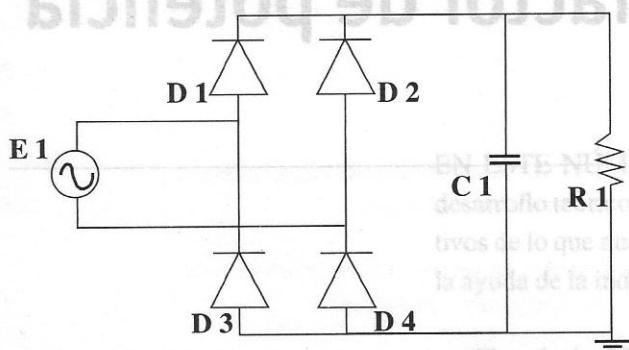


Figura 1. Circuito rectificador con un condensador como filtro.

Aunque estos circuitos representan confiabilidad y economía, también presentan ciertas fluctuaciones no deseadas en las ondas fundamentales de voltaje y corriente de la red eléctrica (figura 2a), generando un alto nivel de armónicos (figura 2b), que producen consumos adicionales de potencia (potencias de distorsión) y disminución considerable en el factor de potencia del sistema. Esto se debe a la no linealidad de los circuitos rectificadores.

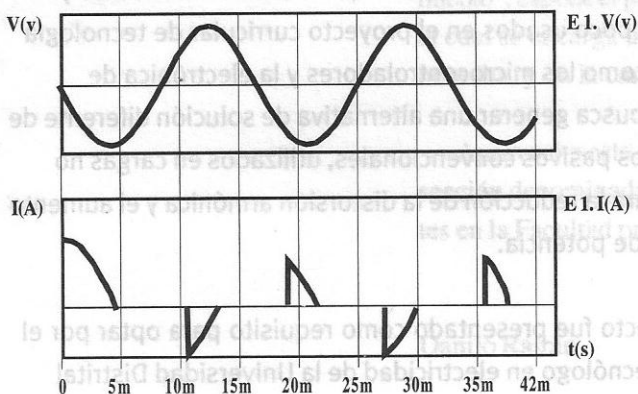


Figura 2a. Formas de onda de V, I del rectificador.

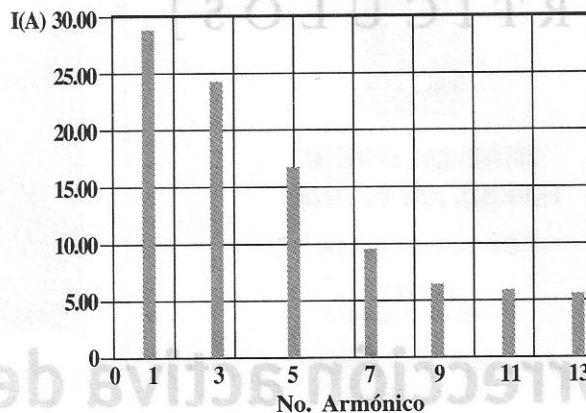


Figura 2b. Espectro de frecuencia sobre la corriente de entrada.

aunque éstos no solucionan el problema ya que trabajan muy bien con la señal fundamental, pero no cuando existe distorsión armónica. La forma más simple de eliminar los armónicos de corriente es insertando una bobina a la entrada del sistema, a modo de filtro resonante diseñado para 60 Hz. Esta bobina tratará de limitar la corriente de entrada y aumentar el tiempo de conducción de la misma. La limitante de este método pasivo es el tamaño y costo de la bobina requerida [2], sin mencionar lo difícil de manejar la corriente de arranque. Por tanto, se ha pensado en emplear un corrector activo que permita reducir la distorsión armónica reconstruyendo la onda de corriente para, entre otras cosas, aumentar la capacidad instalada y evitar los costos elevados del sistema.

La implementación se logra mediante el uso de un convertidor DC/DC para la etapa de potencia y el desarrollo de software para un microcontrolador Motorola, con el fin de realizar el circuito de control del convertidor.

## Factor de potencia y cargas no lineales

La expresión *factor de potencia* se utiliza para designar la relación entre la potencia de que se dispone realmente en una instalación y la potencia de que hubiera podido disponerse si la tensión y la corriente de la instalación estuvieran idealmente en fase [3]. Se denomina factor de potencia (FP) la relación entre la potencia activa o efectiva y la potencia aparente de una instalación:

$$\text{Factor de potencia} = \frac{P}{S}$$

En el caso de voltaje y corriente sinusoidales,

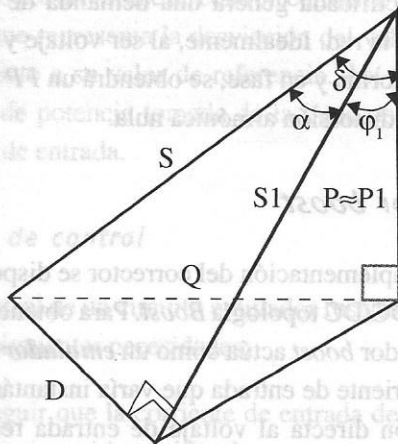
En la actualidad este problema se trata por medio de métodos pasivos; por ejemplo bancos de condensadores,

FP = Cos  $\varphi$ ; donde  $\varphi$  es el ángulo de fase entre el voltaje y la corriente

En las cargas lineales (elementos que consumen energía sin distorsionar las señales de voltaje o corriente), por ejemplo cargas resistivas, el ángulo  $\varphi$  y su respectivo coseno se considera como el FP de la carga. El FP de cargas no lineales (aquellos componentes que alteran la forma de onda del voltaje o corriente añadiéndole distorsión), por ejemplo los dispositivos electrónicos, incluyen un factor de distorsión que es la relación entre el armónico fundamental y el valor eficaz (RMS) de la onda de corriente (figura 3).

Para la figura 3, la potencia activa total ( $P$ ) consumida por la carga es aproximadamente igual a la potencia consumida por la misma carga ( $P_1$ ), debido a la componente fundamental de la corriente distorsionada ( $I_1$ ), incluido el ángulo de defasaje entre voltaje y corriente fundamental ( $j_1$ ).

$D$  = Potencia de distorsión.



$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad P_1 = V * I_1 * \cos \varphi_1$$

$$Q_1 = V * I_1 * \sin \varphi_1$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$D = V \times \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$$

$$S = V \times \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$$

$$D^2 = S^2 - E^2 I^2 [\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi] = E^2 \left( \sum_1^n I_n^2 - I_1^2 \right)$$

$$D^2 = E^2 \sum_2^n (I_n^2)$$

Figura 3. Pirámide de potencias.

Como se ilustra en la figura anterior, la potencia de distorsión,  $D$ , no depende de la componente fundamental de la corriente, sino del orden de los armónicos que posee. El FP se define de la así:

$$FP = \text{Cos } \varphi \times \text{Cos } \alpha = \text{Cos } \delta = \frac{P}{S} = \frac{P}{V \times \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}}$$

### Distorsión armónica

Típicamente, gran parte de la distorsión armónica generada es ocasionada por cargas no lineales conectadas a la red de distribución. En consecuencia, son necesarios ciertos métodos para reducir los armónicos, debido a la proliferación del uso de los convertidores de potencia como rectificadores, convertidores AC/DC e inversores DC/AC.

Entre los efectos más comunes de los armónicos se encuentran los efectos sobre la instalación eléctrica, sobre la carga del consumidor y sobre los circuitos de comunicación. En la instalación eléctrica, las corrientes con distorsión armónica son el principal problema que ocasiona recalentamiento y pérdida de vida útil de la misma. Los armónicos pueden ocasionar también errores de disparo en los tiristores de equipos convertidores, inexactitudes en algunas mediciones y falsos disparos en los dispositivos de protección. El desempeño de los equipos de los consumidores, como variadores de velocidad y fuentes de alimentación de computadoras, puede ser adversamente afectado por los armónicos. Además, las corrientes armónicas que fluyen sobre las líneas de potencia pueden inducir ruido sobre líneas cercanas de comunicación; sin mencionar los efectos de las corrientes de tercer armónico que circularán por los neutros de la instalación.

### Normativa

Debido al acelerado deterioro de la calidad de la potencia distribuida, se han establecido estándares básicos como la IEC 1000, en la parte tercera (IEC 1000-3), la cual se encarga de fijar la limitación de los armónicos de la corriente de entrada de aquellos equipos eléctricos y electrónicos que tengan que conectarse a la red de distribución alterna de baja tensión, además de las fluctuaciones de tensión que el equipo pueda generar. En la sección segunda (IEC 1000-3-2) se detallan los límites



para equipos cuya corriente de entrada hasta de 16 A por fase [4].

En toda esta normativa, se deduce que no se requieren equipos con una distorsión armónica total pequeña para la corriente de entrada (ITHD), sino un cumplimiento individual de los límites para cada armónico. Esta circunstancia avala las soluciones pasivas, pues ellas no consiguen un THD pequeño, pero son capaces de limitar las amplitudes de los armónicos de la corriente por debajo de lo establecido en la normativa. La conclusión es importante pues no es imprescindible obtener un  $FP = 1$  para verificar la normativa.

### Solución

Para la solución de este problema se tienen métodos de corrección pasivos y activos. Entre los **métodos de corrección activos** se encuentran los circuitos convertidores, que forman o compensan la forma de onda de corriente, para lo cual requieren un tipo de sensor que les permita capturar la información para que el convertidor pueda conmutar y, de esta manera, realizar la corrección. Los convertidores son dispositivos electrónicos encargados de transformar la señal suministrada a la entrada en otra de características pre-determinada en la salida. Para este concepto, la conversión de corriente continua a corriente continua (DC/DC) tiene una importancia capital, ya que la gran mayoría de los equipos electrónicos e informáticos, tanto de uso doméstico como industrial, precisan de una alimentación de tensión continua. A menudo ésta debe obtenerse de la red; por tanto, es necesario realizar previamente una conversión AC/DC. La conversión DC/DC significa la obtención de una tensión continua con características determinadas a partir de otro nivel de tensión que no las posee.

### Concepto de emulador resistivo

En el convertidor AC/DC de la figura 4, se ha interpuesto un convertidor DC/DC entre la salida del puente de diodos y el condensador de filtrado. Este convertidor debe estar concebido para que el puente de diodos lo vea como una carga resistiva; de aquí su nombre, *emulador resistivo*, o prerregulador corrector del factor de potencia. Sin embargo, este tipo de denominaciones se utiliza para hacer referencia a todo el sistema, es decir, puente de diodos, convertidor DC/DC y condensador de filtrado.

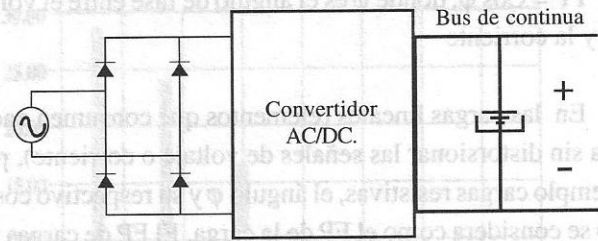


Figura 4. Estructura general de un convertidor AC/DC.

Conviene hacer un par de consideraciones importantes sobre la naturaleza del emulador: es un convertidor conmutado y, por tanto, en condiciones ideales, no presenta pérdidas; su frecuencia de conmutación debe ser mucho más alta que la de la red. Típicamente entre 50 y 200 kHz. La manera de elevar el  $FP$  es muy sencilla de explicar.

La tensión en la entrada del emulador es una onda sinusoidal rectificada puente completo, que origina una demanda de corriente con la misma forma de onda, debido al comportamiento resistivo en la entrada del convertidor. Esta onda rectificada genera una demanda de corriente sinusoidal en la red. Idealmente, al ser voltaje y corriente de la misma forma y en fase, se obtendrá un  $FP$  igual a la unidad y una distorsión armónica nula.

### Convertidor boost

Para la implementación del corrector se dispone de un convertidor DC/DC topología *Boost*. Para obtener un  $FP = 1$ , el convertidor *boost* actúa como un *emulador resistivo*, tomando corriente de entrada que varía instantáneamente en proporción directa al voltaje de entrada rectificado. Además, el convertidor puede emular una inductancia de entrada infinita, programando su corriente para que sea constante o para que pueda operar con corriente de entrada discontinua y ciclo útil constante, operando como un emulador resistivo automático.

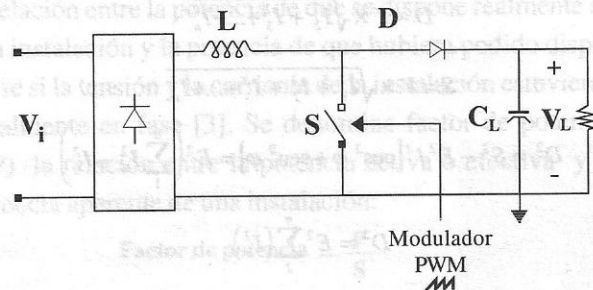


Figura 5. Esquema básico del convertidor boost.

### Funcionamiento

Obsérvese la figura 5. Cuando el interruptor  $S$  esté cerrado ( $0 < t < T_{ON}$ ), toda la tensión de la fuente primaria se aplica sobre la bobina ( $L$ ), lo que provoca que la corriente circulante por la misma aumente, almacenando la inductancia energía durante este intervalo. Si ahora el interruptor se abre ( $T_{ON} < t < T$ ), la tensión que existe en la bobina se suma a la tensión de la fuente, obteniéndose una tensión de salida  $V_L$ , siempre superior a esta última y de idéntica polaridad. Al mismo tiempo, la energía almacenada previamente por la bobina se transfiere a la carga a través del diodo  $D$ , obligando a la corriente a disminuir.

El hecho de operar un convertidor *boost* a una frecuencia mucho mayor que la de la red, permite seguir muy de cerca el voltaje de entrada, con lo cual se tiene como resultado una onda de corriente muy sinusoidal con algún rizado de alta frecuencia. Este circuito se puede montar con facilidad multiplicando una muestra del voltaje de línea rectificado por un voltaje de control, constante en cada medio ciclo, y que representa la desviación del voltaje de salida con respecto a su valor de referencia. Así se controla la cantidad de potencia tomada de la línea por ajuste de la corriente de entrada.

### Circuito de control

El control de un circuito emulador resistivo debe satisfacer las siguientes necesidades:

- Conseguir que la corriente de entrada del rectificador sea una senoide rectificada.
- Conseguir que la tensión de salida sea la deseada.

La primera de estas necesidades puede satisfacerse mediante la realización física de un lazo de realimentación de la corriente de entrada cuya referencia sea una senoide rectificada. Este sistema no exige ninguna característica especial a la topología de potencia. La segunda de las dos necesidades se satisface siempre de la misma manera: con un lazo de realimentación de la tensión que obligue a que ésta sea constante.

Para la implementación del *boost*, se desarrolló e implementó en un microcontrolador de 8 bits un control

basado en el control de corriente por histéresis, en el que la corriente del convertidor sigue de cerca dos límites para reconstruir la onda de corriente. Los límites seno máximo y mínimo (figura 6) se encuentran memorizados en el microcontrolador para modificarlos a gusto del diseñador; ya que los valores de los límites dependerán de la potencia de salida deseada.

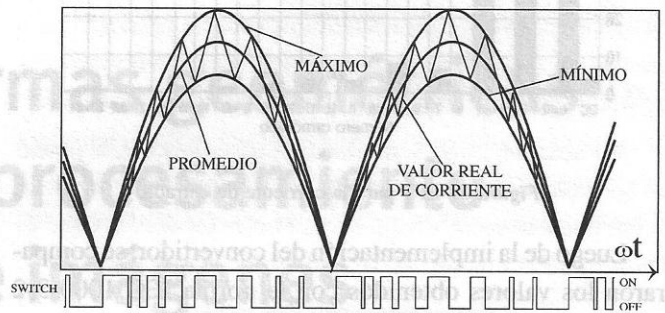


Figura 6. Control de histéresis variable.

El lazo de control obliga a que la corriente de entrada se mantenga siempre dentro de una banda de histéresis, limitada por dos ondas seno rectificadas. Así se logra la corrección de la corriente de entrada.

### Resultados

La señal presentada a continuación es la producida sobre la red eléctrica al ser conectada a ésta una carga de tipo no lineal.

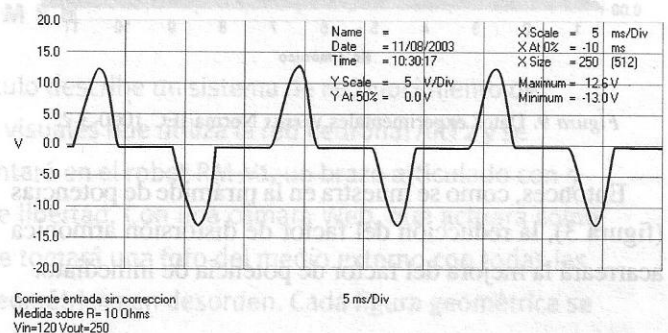


Figura 7. Corriente de entrada sobre el rectificador.

Nótese que esta forma de corriente muestra el gran deterioro que sufre la onda de corriente sobre la red eléctrica, lo cual implica un bajo factor de potencia y un alto contenido armónico, como se observa en la figura siguiente:



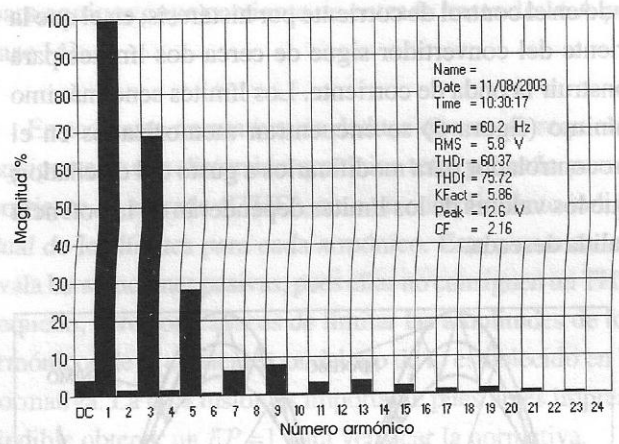


Figura 8. FFT para la corriente de entrada.

Luego de la implementación del convertidor, se compararon los valores obtenidos con la norma IEC 1000-3-2 frente a algunos métodos pasivos con el fin de valorar la utilidad del convertidor. Se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 9. Obsérvese la disminución de la distorsión y lo cercano a la norma.

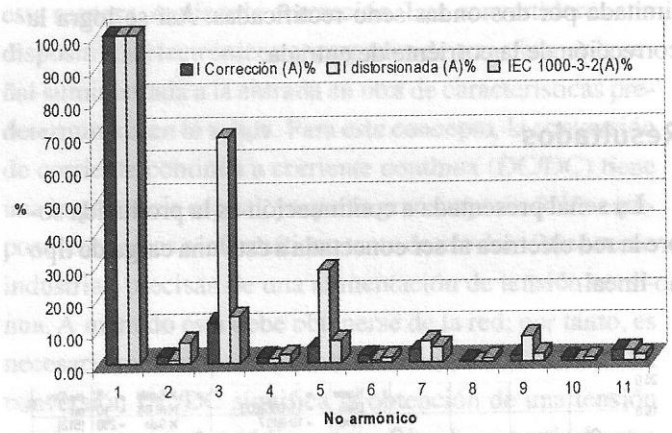


Figura 9. Datos experimentales versus Norma IEC 1000-3-2.

Entonces, como se muestra en la pirámide de potencias (figura 3), la reducción del factor de distorsión armónica acarreará la mejora del factor de potencia de inmediato.

**Conclusión**

El uso de configuraciones pasivas para la corrección del factor de potencia en cargas no lineales tiene como resultado final el incumplimiento de algunas normas como la IEC 61000-3-2, ya que se determinó que estos son inadecuados para solucionar el problema propuesto, porque no

logran reducir la distorsión armónica y sí resultan en equipos grandes, costosos y de baja eficiencia. Por esta razón, cuando se desee aumentar el factor de potencia de una red distorsionada, debe pensarse directamente en el uso de un corrector activo, que permite la posibilidad de corregir electrónicamente el factor de potencia (de los mismos equipos electrónicos) reconstruyendo la onda de corriente, disminuyendo la distorsión y elevando el factor de potencia.

**Referencias**

- [1] Rashid, Muhamand. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. México, Prentice Hall, 1993.
- [2] Martínez F., W. Mendoza. *Corrección Activa del Factor de Potencia*. Proyecto de grado Universidad Nacional de Colombia, pp. 69-76, 1997.
- [3] Ramírez Vásquez, José. *El factor de potencia*. Barcelona, Ediciones CEAC, S.A., p.12.
- [4] IEC61000-3-2: 1995/BSEN61000-3-2: 1995. *Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 3: Limits. Section 2. Limits for harmonic current emissions (equipment input current < 16A per phase)*.